

Міністерство освіти і науки України
Національний університет водного господарства та
природокористування

Навчально-науковий інститут автоматики, кібернетики та
обчислювальної техніки

Кафедра автоматизації, електротехнічних та
комп'ютерно-інтегрованих технологій

04-03-290

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до виконання практичних завдань з навчальної дисципліни
«Промислова електроніка»

для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня за
освітньо-професійною програмою «Електроенергетика, електротехніка
та електромеханіка» спеціальності

141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
денної та заочної форм навчання

Рекомендовано науково-
методичною радою з
якості ННІ АКOT
Протокол № 8 від
29.04.2020 р.

Рівне – 2020

Методичні вказівки до виконання практичних завдань з навчальної дисципліни «Промислова електроніка» для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня за освітньо-професійною програмою «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» денної та заочної форм навчання [Електронне видання] / Гудь В. М. – Рівне : НУВГП, 2020. – 33 с.

Укладач:

Гудь В. М. доцент кафедри автоматизації, електротехнічних та комп'ютерно-інтегрованих технологій, кандидат фізико-математичних наук, доцент.

Відповідальний за випуск:

Древецький В. В., завідувач кафедри автоматизації, електротехнічних та комп'ютерно-інтегрованих технологій, докт. техн. наук, професор.

Керівник групи забезпечення спеціальності

Василець С. В.

© Гудь В. М., 2020
© НУВГП, 2020

ЗМІСТ

ПЕРЕДМОВА	4
ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ 1. РОЗРАХУНОК КЕРОВАНОГО ВИПРЯМЛЯЧА	5
ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ 2. РОЗРАХУНОК ПІДСИЛЮВАЧА ПОТУЖНОСТІ	10
ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ 3. РОЗРАХУНОК ПІДСИЛЮВАЧА НА ОПЕРАЦІЙНОМУ ПІДСИЛЮВАЧІ	17
ДОДАТКИ	22
Порядок вибору пасивних елементів електричної схеми	22
Постійні резистори	22
Конденсатори постійної ємності	23
Основні параметри деяких транзисторів	24
Основні параметри тиристорів типу T10	25
Основні параметри діодів типу КД2	26
Пускова характеристика тиристора	27
Вольт-амперні характеристики транзисторів	27
Список рекомендованої літератури	33

ПЕРЕДМОВА

Метою навчальної дисципліни «Промислова електроніка» є закріплення знань теоретичного курсу і одержання навичок практичного використання знань з електроніки у виробничій діяльності майбутнього інженера.

Методичні вказівки включають виконання завдань з:

- розрахунку регуляторів випрямленої напруги;
- розрахунку підсилювачів потужності на біполярних транзисторах в дискретному виконанні;
- розрахунку електронних пристроїв на операційних підсилювачах.

Завдання 1 передбачає одержання практичних навичок розрахунку регуляторів випрямленої напруги. Виконуючи завдання 2 студент набуває навичок розрахунку підсилювача потужності, та вміння вибирати компоненти електричної схеми і інтегральні стабілізатори напруги. Завдання 3 електричних кіл котрі містять операційний підсилювач.

За результатами практичної роботи студент самостійно виконує розрахунок аналогічний розглянутому прикладу за індивідуальним варіантом.

Вибір варіанту завдання та вимоги до оформлення самостійної роботи

Номер варіанту визначається трьома останніми цифрами навчального шифру (залікової книжки) студента.

Самостійна робота оформляється студентом **власноручно** на аркушах формату А-4 жорстко скріплених по лівому полю або в зошитах.

На титульній сторінці роботи вказується:

Самостійна робота з дисципліни: «Промислова електроніка»

студента (назва факультету)

групи (шифр групи)

(Прізвище, ім'я, по батькові)

навчальний шифр

При виконанні завдань потрібно додавати короткі, але чіткі пояснення, та записувати всі необхідні для виконання завдання формули. Побудову принципів схем виконувати згідно діючих стандартів.

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ 1

РОЗРАХУНОК КЕРОВАНОГО ВИПРЯМЛЯЧА

Провести розрахунок керованого випрямляча, типова схема якого наведена на рис.1.1.

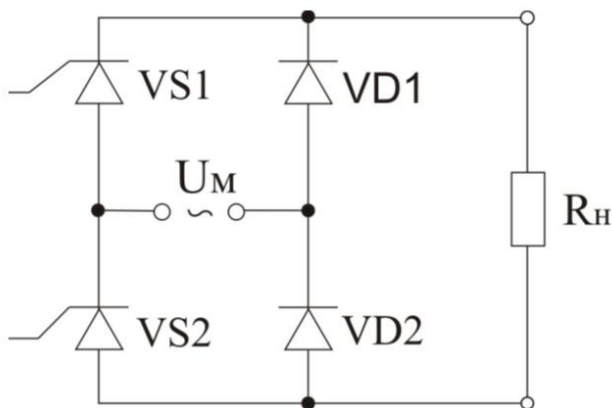


Рис.1.1. Типова схема керованого випрямляча

Вихідними даними для розрахунку є:

U_M , В - діюче значення напруги мережі живлення;

$f_M = 50$ Гц - частота струму мережі живлення;

R_n , Ом - опір навантаження;

$\beta_n = \frac{P_n}{P_M}$ - коефіцієнт навантаження;

U_K , В - напруга кола керування тиристорами.

Варіанти вихідних даних наведені у табл. 1.1.

В роботі необхідно:

- описати принцип роботи наведеного випрямляча та визначити:

1) амплітудні і середні значення струмів та напруг при куті керування $\alpha = 0$;

2) максимальне P_M та номінальне P_n значення потужностей, що виділяються на навантаженні;

- 3) кут керування α_n при номінальній потужності;
 - 4) напругу вмикання тиристора для заданого кута керування;
 - 5) опір обмежуючого резистора для забезпечення необхідного струму керування;
 - 6) тип резисторів (з точністю ± 1 Ом), діодів та тиристорів для випрямляча.
- **нарисувати принципову схему отриманого керованого випрямляча та вказати тип охолодження тиристорів та діодів.**

Таблиця 1.1

Вихідні дані для розрахунку регульованого випрямляча

Цифри номера залікової книжки		1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
десятки	одиниці										
	U_m , В	75	75	127	127	220	220	380	380	660	660
	R_n , Ом	4	6	6	8	8	10	10	14	14	16
β , %		50	55	60	65	70	75	80	85	90	95
U_k , В		5	6	5	6	5	6	5	6	5	6

Приклад вибору варіанта за номером залікової книжки 77732: зі стовпця 2 вибираємо: $U_m = 75$ В, $R_n = 6$ Ом; зі стовпця 3 вибираємо: $\beta = 60$ %, $U_k = 5$ В.

Приклад розрахунку

Вихідні дані:

- 1) діюче значення напруги мережі живлення $U_m = 380$ В;
- 2) опір навантаження $R_n = 7,5$ Ом;
- 3) коефіцієнт навантаження в номінальному режимі $\beta_n = 75$ %;
- 4) напруга живлення системи керування тиристора $U_k = 10$ В;
- 5) охолодження тиристорів повітряне, природне.

Порядок розрахунку

1. Визначаємо амплітудне значення зворотної напруги на тиристорах і діодах:

$$U_A = \sqrt{2} \cdot U_M = \sqrt{2} \cdot 380 = 537,4 \text{ (В)}. \quad (1.1)$$

2. Визначаємо амплітудне значення прямого струму:

$$I_A = \frac{U_A}{R_n} = \frac{537,4}{7,5} = 71,65 \text{ (А)}. \quad (1.2)$$

3. Визначаємо середнє значення струму, який протікає через плече випрямляча при куті керування $\alpha = 0$:

$$I = \frac{I_A}{2 \cdot \pi} (1 + \cos \alpha) = \frac{71,65}{2 \cdot \pi} \cdot 2 = 22,75 \text{ (А)}. \quad (1.3)$$

4. Вибираємо тиристори та діоди, параметри яких відповідають умовам:

$$U_n > k \cdot U_A, \quad I_{cp} > I, \quad (1.4)$$

де U_n - допустиме значення повторюваної напруги на тиристорі або діоді (амплітудне значення);

$k = 1,25$ - коефіцієнт запасу, що враховує можливі перенапруги;

I_{cp} - середнє значення допустимого граничного струму тиристора з типовим охолоджувачем в умовах природного повітряного охолодження при температурі повітря 25°C .

Із табл. 5 додатку вибираємо тиристор Т10-80, що має параметри:

$$U_{nm} = 700 > 537,4 \cdot 1,25 = 669,75 \text{ (В)}, \quad I_{cpm} = 25 > 22,75 \text{ (А)}$$

- струм керування $I_{кер\ m} = 0,15 \text{ А}$;
- напруга керування $U_{кер\ m} = 4 \text{ В}$;
- порогова напруга $U_0 = 1,02 \text{ В}$;
- динамічний опір у відкритому стані $R_\theta = 1,7 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}$;
- встановлений тепловий опір $R_T = 3,4 \text{ }^\circ \text{C/Вт}$.

Із табл.6 додатку вибираємо діоди марки КД2997А, що мають такі параметри: $U_{n\ d} = 200 \text{ (В)}$, $I_{cp\ d} = 30 > 22,75 \text{ (А)}$. Для забезпечення необхідного значення зворотної напруги, з'єднуємо чотири діоди послідовно: $(U_{n\ d} = 200) \cdot 4 > 669,75 \text{ (В)}$.

5. Визначаємо потужність P_M , яка виділяється в навантаженні при куті керування $\alpha = 0$:

$$P_M = \frac{U_M^2}{R_n} = \frac{380^2}{7,5} = 19,25 \cdot 10^3 \text{ (Вт)}. \quad (1.5)$$

6. Визначаємо величину потужності P_f , яка повинна виділятися в навантаженні у номінальному режимі:

$$P_n = \beta \cdot P_M = 0,75 \cdot 19,25 \cdot 10^3 = 14,44 \cdot 10^3 \text{ (Вт)}. \quad (1.6)$$

7. Визначаємо величину діючого значення напруги на навантаженні в номінальному режимі:

$$U_n = \sqrt{P_n \cdot R_n} = \sqrt{14,44 \cdot 10^3 \cdot 7,5} = 329,06 \text{ (В)}. \quad (1.7)$$

8. За співвідношенням:

$$U_o(\alpha) = U_M \sqrt{1 - \frac{\alpha}{180} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi}}, \quad (1.8)$$

визначаємо діюче значення напруги при кутах керування: $\alpha = 0, 10, 20, \dots, 90^\circ$ (табл.1.2) і будуємо залежність діючої напруги на навантаженні від кута керування $U_o(\alpha)$ (рис.1.2).

Таблиця.1.2

$\alpha, ^\circ$	U_o
0	380,00
10	379,79
20	378,32
30	374,48
40	367,35
50	356,26
60	340,84
70	320,96
80	296,79
90	268,70

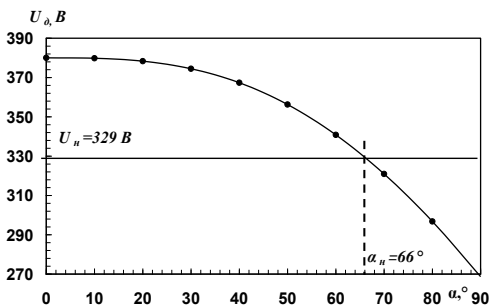


Рис.1.2. Залежність діючої напруги на навантаженні від кута керування

9. Із залежності $U_o(\alpha)$ (рис.1.2) визначаємо кут керування в номінальному режимі $\alpha_n = 66^\circ$.

10. Визначаємо значення напруги відкриття тиристора $U_{вм}$, яке забезпечить кут вмикання $\alpha_n = 66^\circ$:

$$U_{\text{вм}} = U_A \cdot \sin \alpha_n = 537,4 \cdot \sin 66^\circ = 537,4 \cdot 0,91 = 490,94 \text{ (В)}. \quad (1.9)$$

11. Із пускової характеристики тиристора визначаємо величину струму керування. З рис.1 додатку слідує, що відносному значенню напруги вмикання $U_{\text{вм}}/U_{\text{н т}} = 490,94/700 = 0,7$ відповідає відносне значення струму керування тиристора $I_{\text{кер н}}/I_{\text{кер м}} = 0,23$. Звідки маємо $I_{\text{кер н}} = 0,23 \cdot I_{\text{кер м}} = 0,23 \cdot 0,15 = 0,0345 \text{ (А)}$.

12. Визначаємо розрахункову величину опору обмежуючих резисторів R_1 та R_2 кіл керування тиристорами VS1 та VS2:

$$R_1 = R_2 = \frac{U_{\kappa} - U_{\text{кер м}}}{I_{\text{кер н}}} = \frac{10 - 4}{0,0345} = 174 \text{ (Ом)}. \quad (1.10)$$

13. З таблиці 2 додатку вибираємо резистори з найближчим значенням опору типу С2-33 опором 180 Ом із допустимою розсіюванню потужністю 0,25 Вт.

14. Визначаємо величину потужності, яка розсіюється на вибраних резисторах R_1 та R_2 :

$$P_1 = P_2 = I_{\text{кер н}}^2 \cdot R_1 = I_{\text{кер н}}^2 \cdot R_2 = 0,0345^2 \cdot 180 = 0,214 \text{ (Вт)}. \quad (1.11)$$

Отже, вибрані резистори задовольняють умову $P_1 = P_2 = 0,214 < 0,25$.

15. Рисуємо принципову схему випрямляча (рис.1.3).

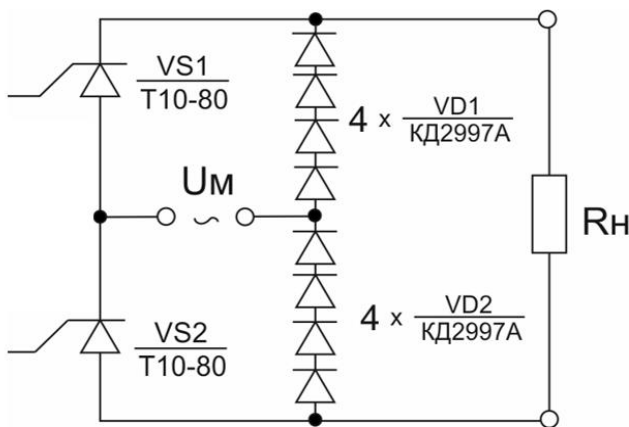


Рис.1.3. Керований випрямляч. Схема електрична принципова

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ 2

РОЗРАХУНОК ПІДСИЛЮВАЧА ПОТУЖНОСТІ

Провести розрахунок двотактного підсилювача потужності, типова схема якого наведена на рис.2.1.

Вихідними даними для розрахунку є:

$U_{вих}$, В - напруга на виході підсилювача;

$P_{вих}$, Вт - потужність на виході підсилювача;

$f_n, f_c = 1$, МГц - нижня та верхня межі частот, що підсилюються.

Необхідно описати принцип роботи підсилювача (із вказанням призначення кожного елемента) та визначити:

- 1) значення напруги джерела живлення підсилювача;
- 2) марки резисторів та конденсаторів;
- 3) коефіцієнти підсилення за струмом K_I , напругою K_U та потужністю K_P ;

Нарисувати електричну принципову схему підсилювача.

Варіанти вихідних даних наведені у табл. 2.1-2.2.

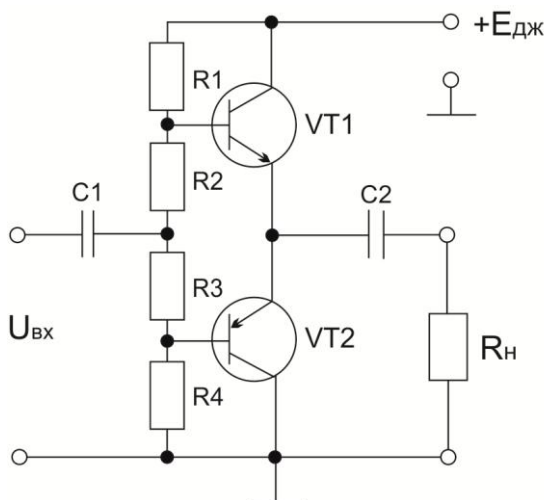


Рис. 2.1. Типова схема підсилювача потужності на транзисторах різного типу провідності в режимі класу АВ за однополярного стабілізованого джерела живлення

Таблиця 2.1

Значення вихідної напруги

Параметр	Одиниці номера залікової книжки									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$U_{вих}$, В	12	10	8	6	5	4	3	2	1,8	1,5
f_n , кГц	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Таблиця 2.2

Значення вихідної потужності $P_{вих}$, Вт

Десятки	Одиниці									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
1	0,08	0,36	1,0	6,4	12	0,05	0,11	0,7	2,1	3,5
2	0,12	0,40	1,5	6,8	14	0,06	0,12	0,8	2,2	4,0
3	0,16	0,44	2,0	7,2	16	0,07	0,13	0,9	2,3	4,5
4	0,20	0,48	2,5	7,6	18	0,08	0,14	1,0	2,4	5,0
5	0,24	0,52	3,0	8,0	20	0,09	0,15	1,1	2,5	5,5
6	0,28	0,56	3,5	8,4	22	0,10	0,16	1,2	2,6	6,0
7	0,32	0,60	4,0	8,8	24	0,11	0,17	1,3	2,7	6,5
8	0,36	0,64	4,5	9,2	26	0,12	0,18	1,4	2,8	7,0
9	0,40	0,68	5,0	9,6	28	0,13	0,19	1,5	2,9	7,5
0	0,44	0,72	6,0	10,0	30	0,14	0,20	1,6	3,0	8,0

Приклад вибору варіанта для номера залікової книжки 77732:
 з стовпця 2 табл.2.1. маємо $U_{вих} = 10$ В $f_n = 2$ кГц; із табл.2.2., на перехресті стовпця 2 та рядка 3 маємо $P_{вих} = 0,44$ Вт.

Приклад розрахунку

Вихідні дані:

1) напруга на виході підсилювача $U_{вих} = 2,5$ В;

потужність на виході підсилювача $P_{вих} = 1,5$ Вт;

3) нижній діапазон частот $f_n = 2,5$ кГц;

Порядок розрахунку

Розрахунок, можна провести в наступній послідовності:

1. Визначаємо амплітудне значення $U_{вих\ A}$ напруги вихідного сигналу:

$$U_{вих\ A} = \sqrt{2}U_{вих} = \sqrt{2} \cdot 2,5 = 3,54 \text{ (В)}. \quad (2.1)$$

2. Визначаємо опір навантаження R_H :

$$R_H = \frac{U_{вих}^2}{P_{вих}} = \frac{2,5^2}{1,5} = 4,17 \text{ (Ом)}. \quad (2.2)$$

3. Визначаємо амплітудне значення струму $I_{вих\ A}$ вихідного кола підсилювача:

$$I_{вих\ A} = \frac{U_{вих\ A}}{R_H} = \frac{3,54}{4,17} = 0,85 \text{ (А)}. \quad (2.3)$$

4. Визначаємо необхідне значення напруги живлення підсилювача:

$$\begin{aligned} E_{дж} &= 2 \cdot (1,01 \div 1,1) (U_{вих\ A} + r_{нас} \cdot I_{вих\ A}) = \\ &= 2 \cdot 1,05 \cdot (3,54 + 0,5 \cdot 0,85) = 8,74 \text{ (В)}, \end{aligned} \quad (2.4)$$

де $r_{нас} \approx 0,5$ - опір вихідного кола транзистора у відкритому стані.

5. Із ряду рекомендованого Держстандартом:

$$(5, 6, 9, 12, 15, 18, 24, 27, 36, 48) \text{ В},$$

вибираємо величину напруги живлення підсилювача $E_{дж} = 9 \text{ (В)}$.

6. Визначаємо величину максимально допустимої потужності, що розсіюється в колекторі транзистора:

$$P_T = \frac{P_{вих}}{\eta_{T_{вих}}} = \frac{1,5}{0,8} = 1,875 \text{ (Вт)}, \quad (2.5)$$

де $\eta_{T_{вих}} = 0,4 \div 0,9$ - коефіцієнт завантаження транзистора (приймається рівним 0,8).

7. Знаходимо потужність, що споживається колекторним колом від джерела живлення для двотактного каскаду у режимі класу АВ або В:

$$P_K = \frac{P_T (1 - \eta_{вих.каскад})}{2\eta_{вих.каскад}} = \frac{1,875(1 - 0,65)}{2 \cdot 0,65} = 0,50 \text{ (Вт)}, \quad (2.6)$$

де $\eta_{\text{вих.каскад}}$ - ККД вихідного каскаду (для двотактного каскаду приймається від 0,6 до 0,7).

8. За знайденими значеннями вибираємо тип транзистора вихідного каскаду з табл.4 додатку. При цьому необхідно, щоб виконувались умови:

$$\begin{aligned} f_{p21E} &> 2 \cdot f_v, P_{K \text{ макс}} > (1,2 \div 1,4) \cdot P_K, \\ U_{K \text{ макс}} &> E_{\text{дж}} / 2, I_{K \text{ макс}} > 1,15 \cdot I_{\text{вих } A}, \end{aligned} \quad (2.7)$$

де f_{p21E} — гранична частота коефіцієнта передачі струму для вибраного типу транзистора у схемі з СЕ;

$P_{K \text{ макс}}$ — максимально допустима потужність, що розсіюється на колекторі вибраного транзистора;

$U_{K \text{ макс}}$ — максимально допустима напруга, між колектором та емітером вибраного транзистора;

$I_{K \text{ макс}}$ — максимально допустиме значення струму колектора, вибраного транзистора;

Вибираємо транзистори КТ 814Г і КТ 815Г з параметрами:

$$\begin{aligned} f_{p21E} &= 3 \text{ (МГц)}; P_{K \text{ макс}} = 1000 \text{ (мВт)}; \\ U_{K \text{ макс}} &= 40 \text{ (В)}; I_{K \text{ макс}} = 1500 \text{ (мА)}. \end{aligned}$$

9. Визначаємо амплітудне значення струму колектора:

$$I_{K A} \approx 0,95 \cdot I_{E A} = 0,95 \cdot I_{\text{вих } A} = 0,95 \cdot 0,85 = 0,81 \text{ (А)}. \quad (2.8)$$

10. Визначаємо величини мінімального $I_{E 0}$ та максимального $I_{E 1}$ струмів кола колектора транзисторів за співвідношеннями:

$$\begin{aligned} I_{K 0} &\leq (0,03 \div 0,1) \cdot I_{K A} = 0,1 \cdot 0,81 = 0,08 \text{ (А)}, \\ I_{K M} &= I_{K 0} + I_{K A} = 0,08 + 0,81 = 0,89 \text{ (А)}. \end{aligned} \quad (2.9)$$

11. На сім'ях вихідних статичних характеристик транзисторів, для схеми із спільним емітером рис.13 і рис.15 додатку, будуємо навантажувальні прямі за змінним струмом колектора (рис.2.2), які проходять через точки:

$A(-E_{\text{дж}}/2; 0)$ і $B(-E_{\text{дж}}/2 + U_{\text{вих } A}; I_{K M})$ для транзистора КТ814Г та $A(E_{\text{дж}}/2; 0)$ і $B(E_{\text{дж}}/2 - U_{\text{вих } A}; I_{K M})$ для транзистора КТ815Г

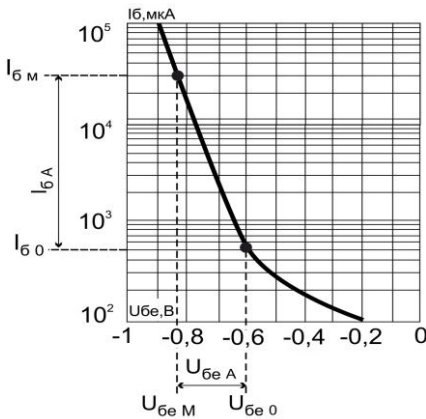


Рис.2.2.а. Вхідна статична характеристика транзисторів КТ814Г

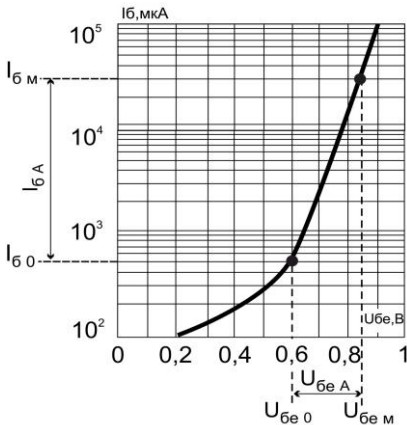


Рис.2.2.в. Вхідна статична характеристика транзисторів КТ815Г

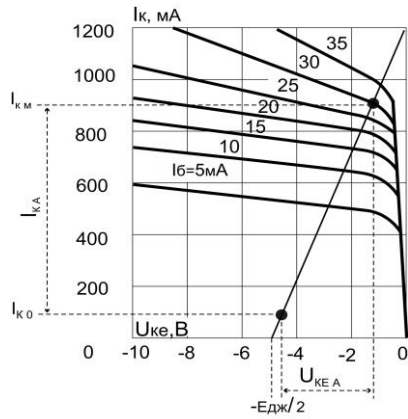


Рис.2.2.б. Вихідна статична характеристика транзистора КТ814Г

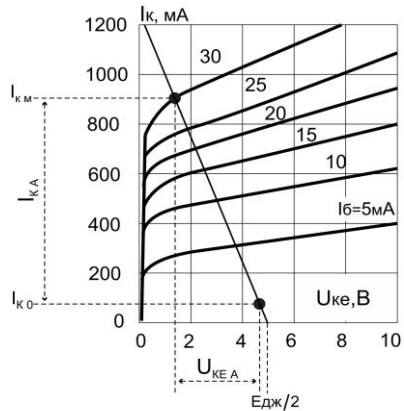


Рис.2.2.г. Вихідна статична характеристика транзистора КТ815Г

12. В результаті побудови навантажувальних характеристик визначаємо мінімальне I_{B0} , максимальне I_{BM} та амплітудне I_{BA} значення струмів бази:

$$\begin{aligned} I_{B0} &\approx 0,5 \text{ (мА)}, & I_{BM} &\approx 30 \text{ (мА)}, \\ I_{BA} &\approx I_{BM} - I_{B0} \approx 30 - 0,5 = 29,5 \text{ (мА)}. \end{aligned} \quad (2.10)$$

13. Перенісши відповідні значення струмів I_{B0} і I_{BM} на вхідні характеристики транзисторів для схеми із спільним емітером з рис.12 і рис.14 додатку, визначаємо мінімальне U_{BE0} та максимальне U_{BEM} значення напруги на переходах база-емітер транзисторів:

$$U_{BE0} = -0,6 \text{ (В)} \text{ та } U_{BEM} = -0,85 \text{ (В)} \text{ для КТ 814Г}$$

$$U_{BE0} = 0,6 \text{ (В)} \text{ та } U_{BEM} = 0,85 \text{ (В)} \text{ для КТ 815Г}$$

14. Визначаємо опори подільника напруги R_1 , R_2 , R_3 , R_4 приймаючи, що струм подільника I_∂ повинен бути у $2 \div 5$ разів більшим струму бази I_{B0} . Тому приймаємо:

$$I_\partial = 5 \cdot I_{B0} = 5 \cdot 0,5 = 2,5 \text{ (мА)}. \quad (2.11)$$

Отже:

$$R_1 = \frac{E_{\partial\partial} / 2 - U_{BE0}}{I_\partial + 2 \cdot I_{B0}} = \frac{4,5 - 0,6}{0,0025 + 0,001} = 1,14 \text{ (кОм)}$$

$$R_4 = \frac{U_{KB0}}{I_\partial} = \frac{E_{\partial\partial} / 2 - U_{BE0}}{I_\partial} = \frac{4,5 - 0,6}{0,0025} = 1,56 \text{ (кОм)} \quad (2.12)$$

$$R_2 = R_3 = \frac{U_{BE0}}{I_\partial + I_{B0}} = \frac{0,6}{0,0025 + 0,0005} = 200 \text{ (Ом)}$$

Із ряду Е24 табл.1 додатку вибираємо резистори з найближчим номінальним опором 1,1 та 1,6 кОм та 200 Ом та перевіряємо їх на розсіювану потужність.

$$P_1 = (I_\partial + 2 \cdot I_{B0})^2 \cdot 1100 = (3,5 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 1100 = 0,013 \text{ (Вт)}$$

$$P_2 = P_3 = (I_\partial + I_{B0})^2 \cdot 200 = (3 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 16 = 0,0018 \text{ (Вт)} \quad (2.13)$$

$$P_4 = I_\partial^2 \cdot 1600 = (2,5 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 1600 = 0,01 \text{ (Вт)}$$

Із табл.2 додатку вибираємо резистори типу С2-33 з допустимою розсіюванню потужність 0,125 Вт.

15. Визначаємо вхідний опір підсилювача:

$$R_{\text{вх}} \approx r_{\text{вх}} = \frac{U_{BK0}}{I_{B0}} = \frac{E_{\partial\partial} / 2 - U_{BE0}}{I_{B0}} = \frac{4,5 - 0,6}{0,0005} = 7,8 \text{ (кОм)} \quad (2.14)$$

16. Визначаємо ємності конденсаторів C_1 , C_2 :

$$C_1 \approx \frac{10}{\omega_n R_{ex}} = \frac{10}{2\pi \cdot f_n \cdot R_{ex}} = \frac{10}{2 \cdot 3,14 \cdot 2500 \cdot 7800} = 0,08 \text{ (мкФ)} \quad (2.15)$$

$$C_2 \approx \frac{10}{\omega_n R_n} = \frac{10}{2\pi \cdot f_n \cdot R_n} = \frac{10}{2 \cdot 3,14 \cdot 2500 \cdot 4,17} = 152,6 \text{ (мкФ)} \quad (2.16)$$

Вибираємо два однотипні конденсатори типу К 50-35 ємністю 200 (мкФ) $> 152,6 > 0,08$ (мкФ) і номінальною напругою ($U_H = 10 \text{ В}$) $> (9 \text{ В})$.

17. Визначаємо розрахункові коефіцієнти підсилення підсилювача за струмом, напругою та потужністю:

$$K_I = \frac{I_{вих \text{ А}}}{I_{Б \text{ А}}} = \frac{0,85}{29,5 \cdot 10^{-3}} = 28,81 \quad (2.17)$$

$$K_U = \frac{U_{вих \text{ А}}}{U_{вих \text{ А}} + U_{Б \text{ А}}} = \frac{3,54}{3,54 + 0,25} = 0,93 \quad (2.18)$$

$$K_P = K_I \cdot K_U = 28,81 \cdot 0,93 = 26,79 \quad (2.19)$$

18. Рисуємо принципову схему підсилювача

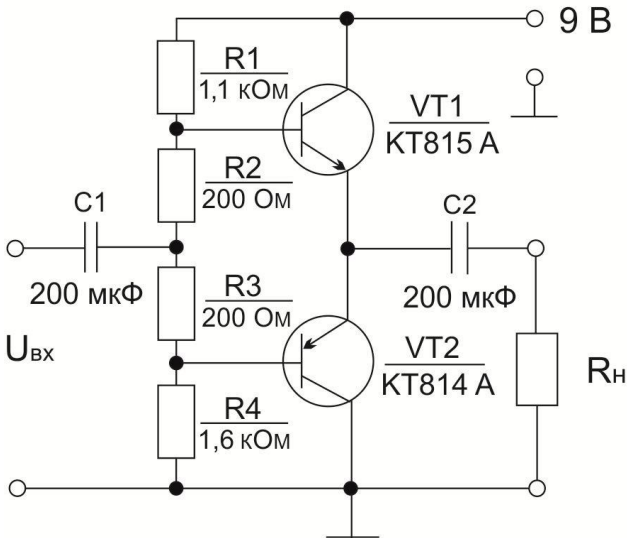


Рис.2.3. Підсилювач потужності. Схема електрична принципова

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ 3

РОЗРАХУНОК ПІДСИЛЮВАЧА НА ОПЕРАЦІЙНОМУ ПІДСИЛЮВАЧІ

Вихідні дані

Вихідними даними для розрахунку є:

- тип та схема підсилюючого каскаду - у даному разі це інвертуючий підсилювач чи двовходовий суматор, розрахункова схема якого наведена на рис.3.1, або неінвертуючий підсилювач за схемою на рис. 3.2;

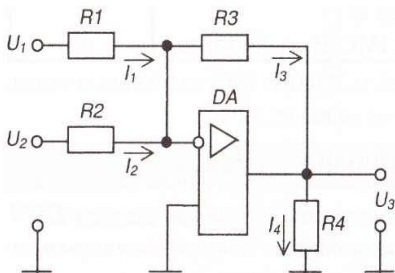


Рис. 3.1. Розрахункова схема двовходового інвертуючого суматора на ОП

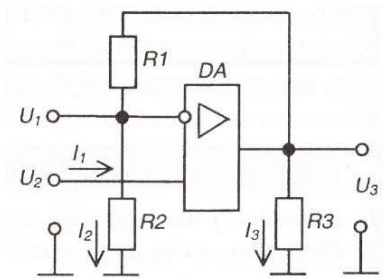


Рис. 3.2. Розрахункова схема неінвертуючого підсилювача на ОП

- величини опорів деяких резисторів схеми каскаду;
- напрямки протікання струмів у гілках каскаду та величини деяких із них;
- величини деяких напруг на входах і виході каскаду або його коефіцієнт підсилення за напругою $K_{U_{33}}$;
- тип ОП та типова схема його вмикання - пропонується будувати каскади на ІМС ОП типу 140УД7, вважаючи його за ідеальний, із напругою живлення ± 12 В, за схемою вмикання, наведеною на рис. 3.3.

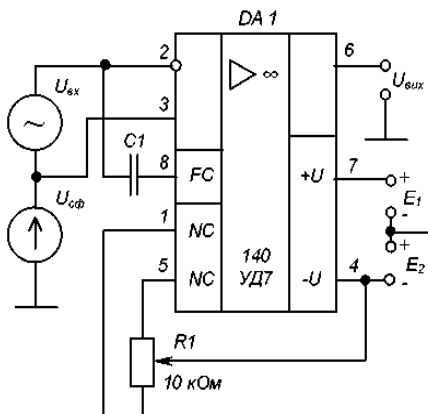


Рис. 3.3 Типова схема вмикання ІМС ОП типу 140УД7

Необхідно описати принцип роботи підсилювача згідно варіанту та визначити:

- 1) величини параметрів, позначених у табл. 3.1 – 3.2 знаком "х";
- 2) тип та потужність резисторів підсилювача згідно схеми.

Також необхідно навести електричну принципову схему підсилювача із поданням заданих та отриманих за результатами розрахунку номінальних значень опорів, величин напруг і струмів, напрямків протікання останніх.

Варіанти вихідних даних наведені у табл. 3.1 та табл. 3.2.

Таблиця 3.1

Вихідні дані для розрахунку інвертуючого суматора або підсилювача на ОП

Десятки номера залікової книжки	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Параметр										
$R_1, \text{кОм}$	1	X	X	1,1	–	–	X	–	2	1,1
$R_2, \text{кОм}$	1,5	3	–	–	1,2	X	–	1	–	-
$R_3, \text{кОм}$	X	30	75	33	X	X	240	X	X	33
$R_4, \text{кОм}$	2	1	6,2	2,2	X	2,4	X	X	X	2,2
$U_1, \text{В}$	1,5	0,15	X	X	–	–	X	–	-0,05	X
$U_2, \text{В}$	-2,5	-0,25	–	–	X	0,01	–	X	–	-
$U_3, \text{В}$	2,5	X	X	X	-5	X	1,2	-2,2	X	X
$I_1, \text{мА}$	X	X	X	0,2	–	–	0,005	–	X	0,2
$I_2, \text{мА}$	X	X	–	–	X	X	–	X	–	–
$I_3, \text{мА}$	X	X	X	X	X	0,05	X	0,02	X	X
$I_4, \text{мА}$	X	0,25	1	X	2,5	X	1	0,01	0,55	X
K_{U33}	–	–	-50	X	-100	-120	-80	X	-110	X

Примітка: Знаком “ – ” у таблиці позначено відсутні для даного варіанту параметри.

Таблиця 3.2

Вихідні дані для розрахунку неінвертуючого підсилювача на ОП

Одиниці номера залікової книжки	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Параметр										
$R_1, \text{кОм}$	18	X	220	X	75	X	24	15	X	36
$R_2, \text{кОм}$	X	1,2	X	3	X	1	X	X	2,4	X
$R_3, \text{кОм}$	10	6,2	3,9	X	2	2	X	X	10	X
$U_1, \text{В}$	-0,3	X	0,044	X	X	X	0,3	X	X	X
$U_2, \text{В}$	X	0,6	X	0,1	0,15	X	X	X	0,2	0,25
$U_3, \text{В}$	-4,8	-9,6	X	5,1	X	-1,25	X	9	3,2	X
$I_1, \text{мА}$	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
$I_2, \text{мА}$	X	X	0,002	X	0,15	X	0,3	0,5	X	X
$I_3, \text{мА}$	X	X	X	1	X	X	3,75	3,75	X	2
K_{U33}	X	X	X	X	51	25	X	6	X	16

Приклад вибору варіанта для номера залікової книжки 77732: зі стовпця 3 табл. 3.1 маємо: R_1 - необхідно визначити, R_2 - відсутній, $R_3 = 75 \text{ кОм}$, $R_4 = 6,2 \text{ кОм}$, U_1 - необхідно визначити, U_2 - відсутня, U_3 - необхідно визначити, I_1 - необхідно визначити, I_2 - відсутній, I_3 - необхідно визначити, $I_4 = 1 \text{ мА}$, $K_{U33} = -50$; зі стовпця 2 табл. 3.2.- R_1 - необхідно визначити, $R_2 = 1,2 \text{ кОм}$, $R_3 = 6,2 \text{ кОм}$, U_1 - необхідно визначити, $U_2 = 0,6 \text{ В}$, $U_3 = -9,6 \text{ В}$, I_1 - необхідно визначити, I_2 - необхідно визначити, I_3 - необхідно визначити, K_{U33} - необхідно визначити.

Приклад розрахунку

Вихідні дані:

$$R_1 = 1 \text{ кОм};$$

R_2 - відсутній;

$$R_4 = 2 \text{ кОм};$$

$$U_1 = 0,15 \text{ В};$$

$$U_3 = -3 \text{ В}.$$

З аналізу вихідних даних видно, що це буде інвертуючий підсилювач, розрахункова схема якого наведена на рис.3.4.

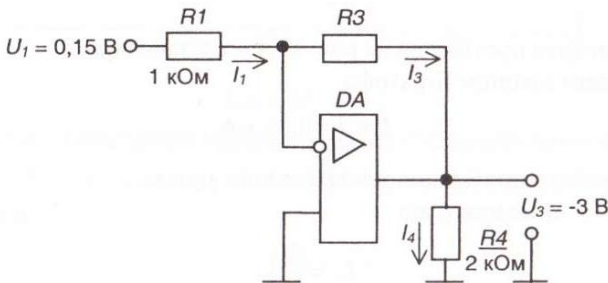


Рис.3.4. Розрахункова схема інвертуючого підсилювача на ОП

Порядок розрахунку

1. Визначаємо коефіцієнт підсилення за напругою:

$$K_{U_{33}} = \frac{U_3}{U_1} = -\frac{R_3}{R_1} = \frac{-3}{0,15} = -20. \quad (3.1)$$

2. Визначаємо опір резистора R_3 :

$$R_3 = -K_{U_{33}} R_1 - (-20) \cdot 1 = 20 \text{ (кОм)}. \quad (3.2)$$

3. Визначаємо величину струму I_1 :

$$I_1 = \frac{U_1}{R_1} = \frac{0,15}{1 \cdot 10^3} = 0,15 \text{ (мА)}. \quad (3.3)$$

4. За першим законом Кірхгофа визначаємо величину струму I_3 :

$$I_3 = I_1 = 0,15 \text{ (мА)}. \quad (3.4)$$

5. За законом Ома визначаємо величину струму I_4 :

$$I_4 = \frac{U_3}{R_4} = \frac{-3}{2} = -1,5 \text{ (мА)}. \quad (3.5)$$

6. Рисуємо електричну принципову схему інвертуючого підсилювача з параметрами, отриманими за даними розрахунку і побудованого на ОП 140УД7 (рис.3.5).

Оскільки підсилювач призначений для підсилення сигналу напруги постійного струму, то корегуючий конденсатор (C_1 на рис. 3.3) не встановлюємо.

7. Визначаємо потужність, яка виділяється на резисторах підсилювача:

$$P_{R1} = R_1 I_1^2 = 1 \cdot 10^3 (0,15 \cdot 10^{-3})^2 = 2,25 \cdot 10^{-5} \text{ (Вт)};$$

$$P_{R3} = R_3 I_3^2 = 20 \cdot 10^3 (0,15 \cdot 10^{-3})^2 = 4,5 \cdot 10^{-4} \text{ (Вт)};$$

$$P_{R4} = R_4 I_4^2 = 2 \cdot 10^3 (1,5 \cdot 10^{-3})^2 = 4,5 \cdot 10^{-3} \text{ (Вт)}.$$

8. З табл.2 додатку вибираємо резистори типу С2-33 з номінальною потужністю 0,125 Вт.

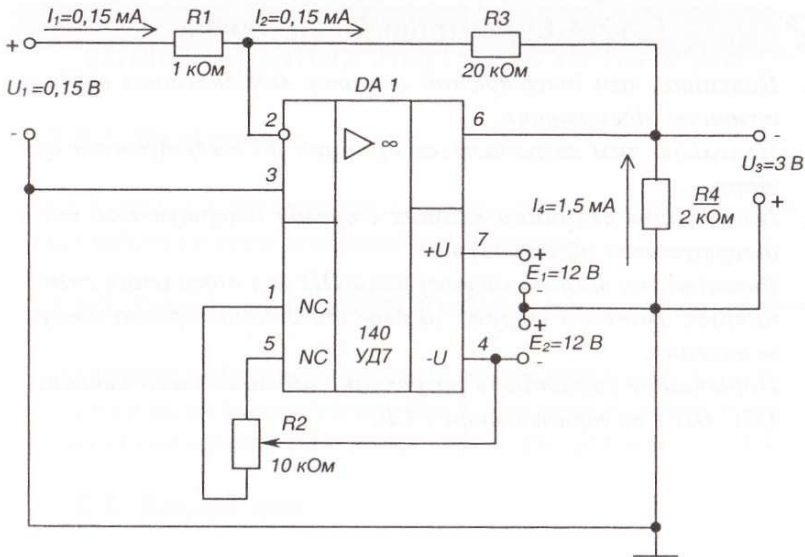


Рис. 3.5. Інвертуючий підсилювач на ОП. Схема електрична принципова

ДОДАТКИ

Таблиці

Порядок вибору пасивних елементів електричної схеми

Елементи схеми вибирають з урахуванням вимог стандартів до певних типів компонент. Номінальне значення параметру, що відповідає конкретній позиції ряду (від 1 до N) обчислюється як $a_i = a_0 q_N^{i-1}$. Деякі ряди номінальних значень наведені у табл.1 Так, для ряду E24: $N = 24$; $q_{24} = \sqrt[24]{10}$; $a_0 = 1$.

Таблиця 1

Ряди номінальних значень

Індекс ряду	Позиції ряду	Допустиме відхилення від номінальної величини, %
E 6	1,0; 1,5; 2,2; 3,3; 4,7; 6,8	± 20
E 12	1,0; 1,2; 1,5; 1,8; 2,2; 2,7; 3,3; 3,9; 4,7; 5,6; 6,8; 8,2	± 10
E 24	1,0; 1,1; 1,2; 1,3; 1,5; 1,6; 1,8; 2,0; 2,2; 2,4; 2,7; 3,0; 3,3; 3,6; 3,9; 4,3; 4,7; 5,1; 5,6; 6,2; 6,8; 7,5; 8,2; 9,1	± 5

Числу в індексі знаменника ряду відповідає кількість позицій ряду: так ряд E24 має 24 номінальних значення у проміжку від 1 до 10 (більша кількість при допустимому відхиленні $\pm 5\%$ не потрібна).

Будь-яке номінальне значення ряду може бути помножене на множник 10^m .

Таблиця 2

Постійні резистори

Тип резистора	Діапазон опорів	Номінальна потужність, Вт
МЛТ	1 Ом-3,01 МОм	0,125
	1 Ом-5,1 МОм	0,25; 0,5
	1 Ом-10 МОм	1; 2
С2-33	1 Ом - 3 МОм	0,125
	1 Ом-5,1 МОм	0,25
	0,1 Ом-5,1 МОм	0,5
	1 Ом - 10 МОм	1
	1 Ом - 22 МОм	2

Таблиця 3

Конденсатори постійної ємності

Номинальна напруга, В	Номинальна ємність, мкФ				
	К 50-7	К 50-35	К 50-18	К10-17	К73-17
6,3		20; 30; 50; 100; 200; 500	220000		
10		10; 20; 30; 50; 100; 200; 500; 1000; 2000; 5000	100000		
16		5; 10; 20; 30; 50; 100; 200; 300; 1000; 2000; 5000	22000 68000 100000		
25		2; 5; 10; 20; 30; 50; 100; 200; 500; 1000; 2000; 5000	15000 33000 100000		
50		2; 5; 10; 20; 30; 50; 100; 200; 500; 1000; 2000	4700 10000 15000 22000	0,001; 0,01; 0,022; 0,056	
63					0,22; 0,33; 0,47; 0,68; 1; 1,5; 2 2' 3,3; 4,7
100		0,5; 1; 2,5; 10; 20; 30; 50	2200 4700 10000		
160	2; 50; 100; 200; 500	1,2; 5; 10; 20			1,5; 2,2
250	10; 20; 50; 100; 200		1000 4700		0,047; 0,068; 0,1; 0,15; 0,22; 0,33; 0,47; 0,68; 1
300	5; 10; 20; 50; 100; 200				

Номинальна напруга, В	Номинальна ємність, мкФ				
	К 50-7	К 50-35	К 50-18	К10-17	К73-17
350	10; 20; 50; 100				
450	10; 20; 50; 100				

Примітки:

- 1) якщо розрахункова величина ємності більша за максимальне номінальне значення конденсаторів даного типу, то необхідне значення ємності забезпечують за рахунок паралельного вмикання потрібної кількості конденсаторів;
- 2) якщо розрахункова величина робочої напруги більша за номінальне значення напруги конденсатора, то використовують послідовне вмикання конденсаторів.

Таблиця 4

Основні параметри деяких транзисторів

Марка транзис- тора	тип	$U_{кбо},$ В	$U_{кео},$ В	$I_{кmax},$ мА	$P_{кmax}(T),$ Вт	$h_{21},$	$I_{бo},$ не більше, мкА	$f_{гр},$ МГц
КТ3102А	<i>n-p-n</i>	50	50	100	0.25	100-200	0.05	150
КТ3107А	<i>p-n-p</i>	50	45	100	0.3	70-140	0.1	200
КТ502Е	<i>p-n-p</i>	100	80	150	0.35	40-120	1	350
КТ503Е	<i>n-p-n</i>	100	80	150	0.35	40-120	1	350
КТ814Г	<i>p-n-p</i>	100	80	1500	1(10)	30-275	50	3
КТ815Г	<i>n-p-n</i>	100	85	1500	1(10)	30-275	50	3
КТ816Г	<i>p-n-p</i>	100	90	3000	1(25)	25-275	100	3
КТ817Г	<i>n-p-n</i>	100	90	3000	1(25)	25-275	100	3
КТ818Г	<i>p-n-p</i>	90	90	10000	1.5(60)	12-225	1000	3
КТ818ГМ		90	90	15000	2(100)	12-225	1000	3
КТ819Г	<i>n-p-n</i>	100	100	10000	1.5(60)	12-225	1000	3
КТ819ГМ		100	100	15000	2(100)	12-225	1000	3

Таблиця 5

Основні параметри тиристорів типу T10

Параметр	Тиристор						Умови режиму
	T10-10	T10-16	T10-25	T10-40	T10-63	T10-80	
Повторювана напруга U_n , В (для всіх тиристорів)	50; 100; 200; 300; 400; 500; 600; 700; 800; 900; 1000; 1100; 1200						
Граничний струм I_{zp} (середнє значення), А	10	16	25	40	63	80	Штучне охолодження; температура корпусу 85°C
Граничний струм з типовим охолоджувачем I_{zpo} (середнє значення), А	8	10	12	14	20	25	Охолодження природне повітряне; температура оточуючого середовища 25 С
Ударний струм I_{y0} , А	240	240	600	960	1300	1500	Тривалість імпульсу струму 10 мс
Порогова напруга U_0 , В	1,64	1,44	1,26	1,16	1,094	1,02	
Динамічний опір у відкритому стані R_δ , МОм	10	7	6,4	4,4	1,8	1,7	
Вмикаючий струм керування, не більше $I_{кер}$, А	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	При прямій напрузі на тиристорі
Вмикаюча напруга керування, не більше $U_{кер}$, В	3	3	3	4	4	4	
Загальний встановлений тепловий опір R_T , °C/Вт	5,9	5,3	4,9	3,69	3,5	3,4	З типовим охолоджувачем при природному повітряному охолодженні

Таблиця 6

Основні параметри діодів типу КД2

Діод	Уп, В	$I_{гр}, A$	$I_{обр. max}, мкА$	$F_d max, кГц$
КД202А	50	5	1000	5
КД202В	100			
КД202Д	200			
КД202Ж	300			
КД202К	400			
КД202М	500			
КД202Р	600			
КД202Т	800			
КД213А	200	10	200	100
КД213Г	100			
КД2999А	200	20	200	100
КД2999Б	100			
КД2999В	50			
КД2997А	200	30	200	100
КД2997Б	100			
КД2997В	50			

Примітки:

1) якщо розрахункова величина зворотної напруги більша за максимальне номінальне значення зворотної напруги діодів даного типу, то необхідне значення напруги забезпечують за рахунок послідовного вмикання потрібної кількості діодів;

2) якщо розрахункова величина прямого струму більша за максимальне номінальне значення прямого струму діодів даного типу, то необхідне значення струму забезпечують за рахунок паралельного вмикання потрібної кількості діодів.

Рисунки

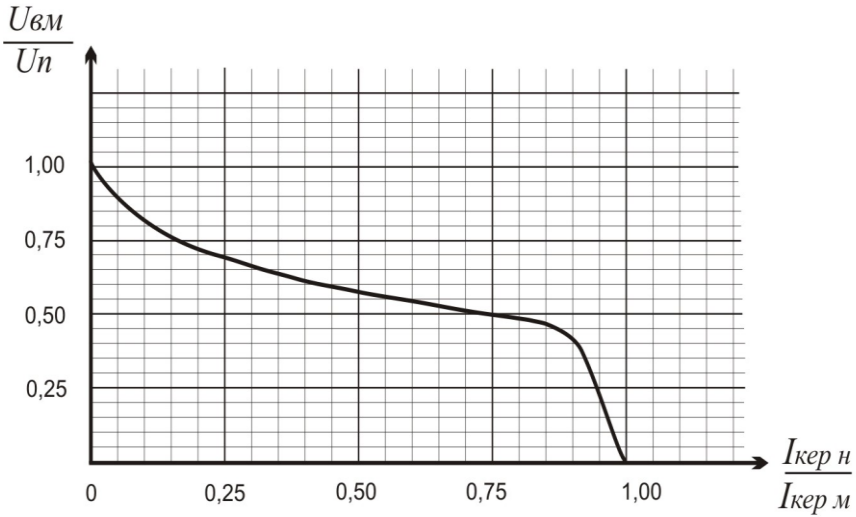


Рис. 1. Пускова характеристика тиристора

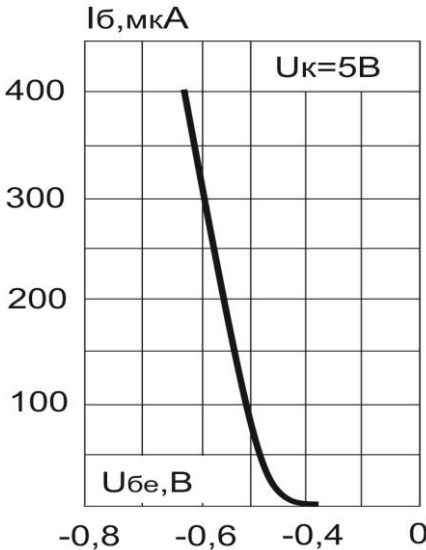


Рис.2. Вхідна статична характеристика транзисторів КТ3102А,В

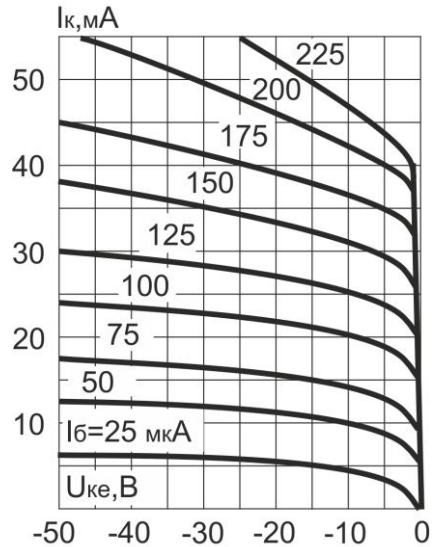


Рис.3. Вихідні статичні характеристики транзисторів КТ3102А,В

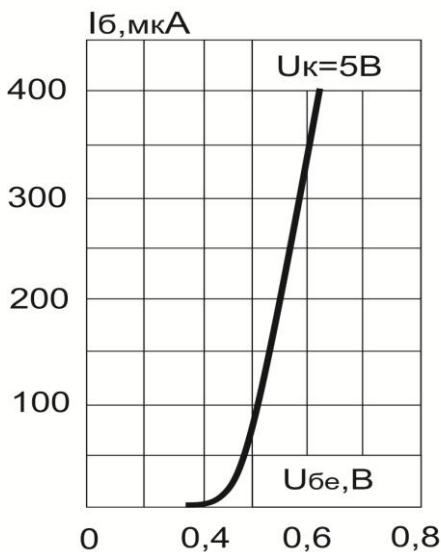


Рис.4. Вхідна статична характеристика транзисторів КТ3107А,В

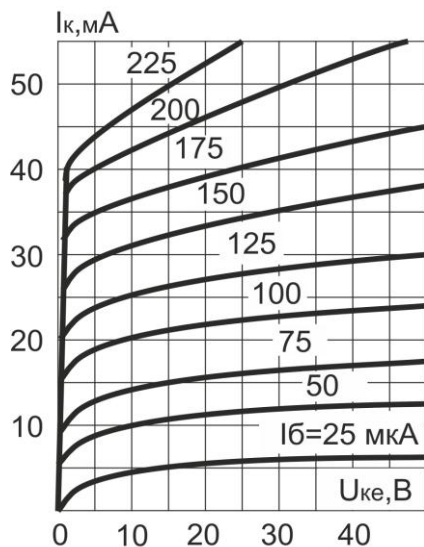


Рис.5. Вихідні статичні характеристики транзисторів КТ3107А,В

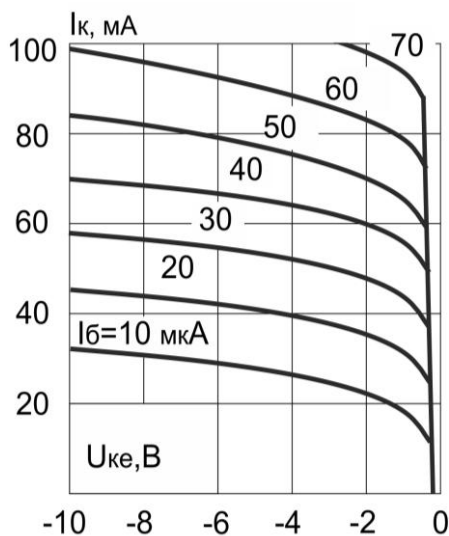


Рис.6. Вихідні статичні характеристики транзисторів КТ502Б, Г

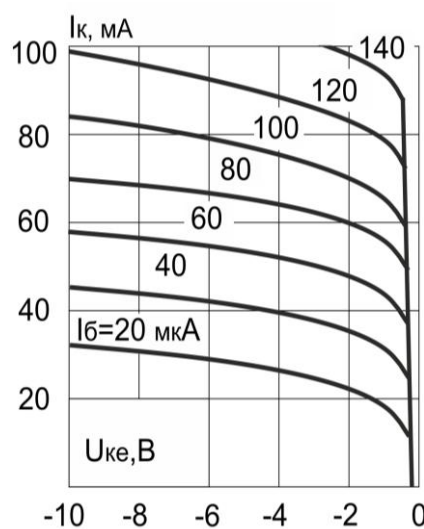


Рис.7. Вихідні статичні характеристики транзисторів КТ502А, В, Д, Е

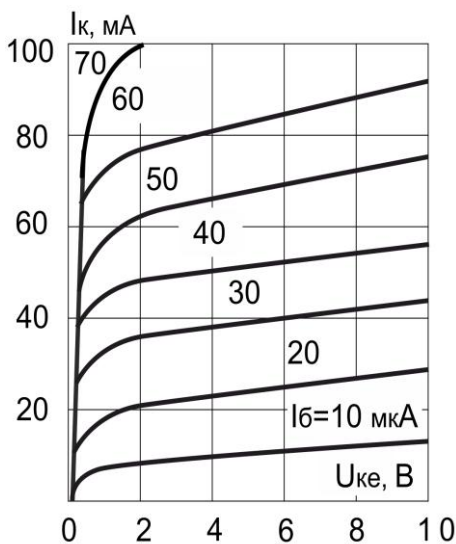


Рис.8. Вихідні статичні характеристики транзисторів КТ503Б, Г

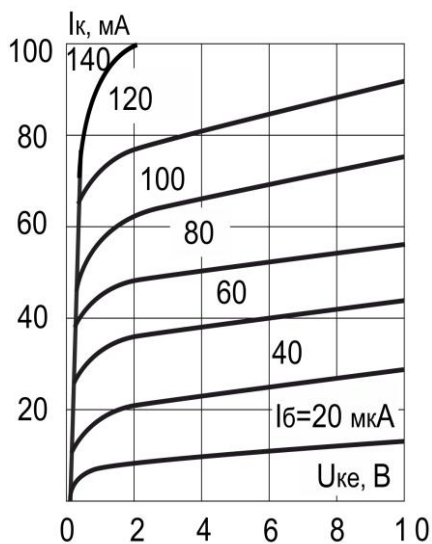


Рис.9. Вихідні статичні характеристики транзисторів КТ503А, В, Д, Е

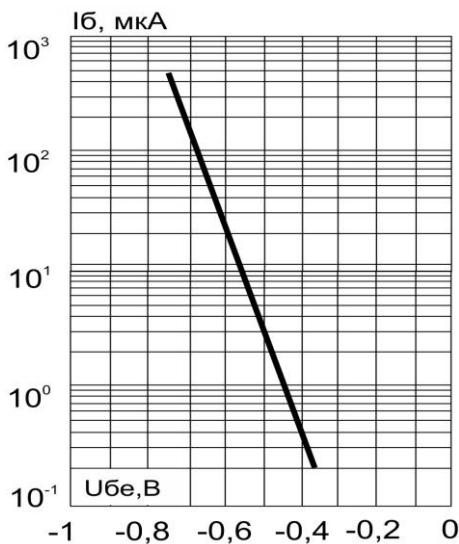


Рис.10. Вхідна статична характеристика транзисторів КТ502А-Е

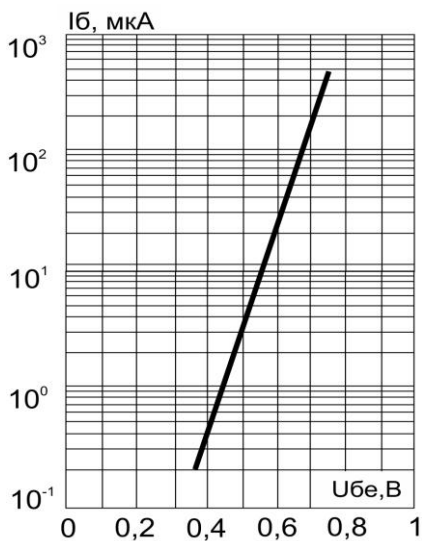


Рис.11. Вхідна статична характеристика транзисторів КТ503А-Е

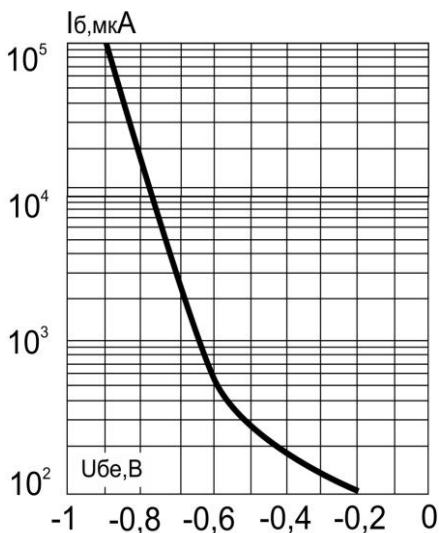


Рис.12. Вхідна статична характеристика транзисторів КТ814А-Г

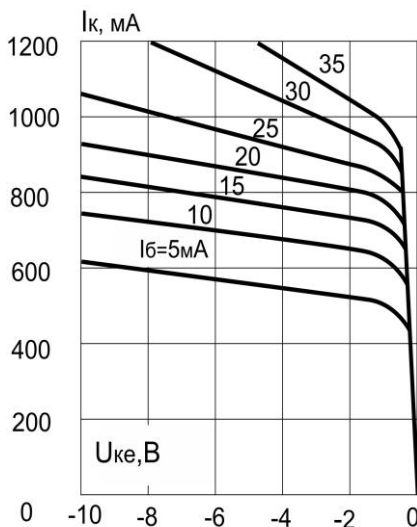


Рис.13. Вихідні статичні характеристики транзисторів КТ814А-Г

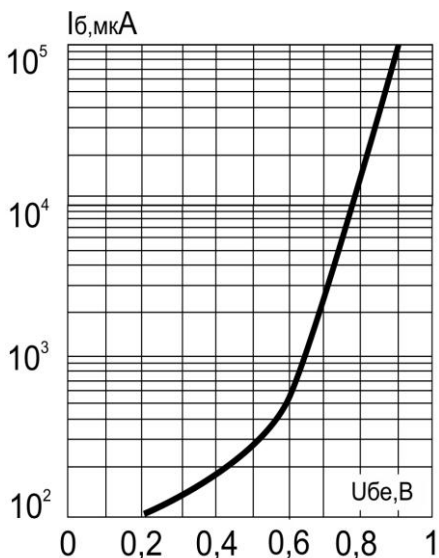


Рис.14. Вхідна статична характеристика транзисторів КТ815А-Г

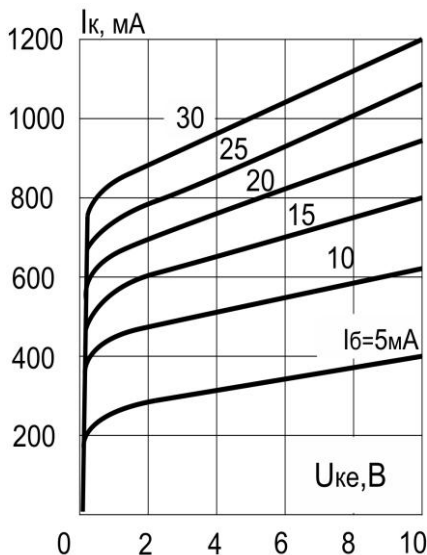


Рис.15. Вихідні статичні характеристики транзисторів КТ815А-Г

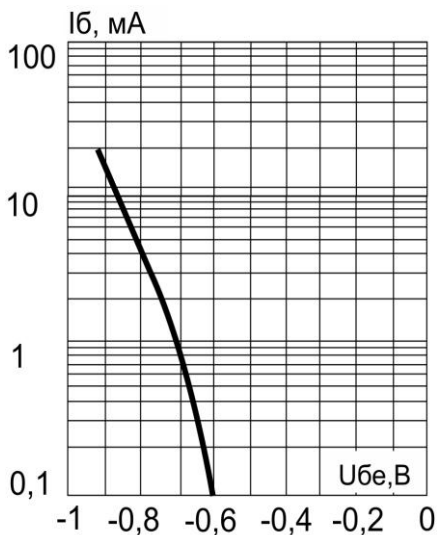


Рис.16. Вхідна статична характеристика транзисторів КТ816А-Г

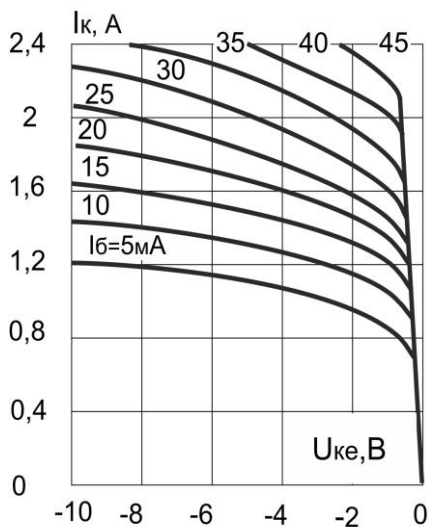


Рис.17. Вихідні статичні характеристики транзисторів КТ816А-Г

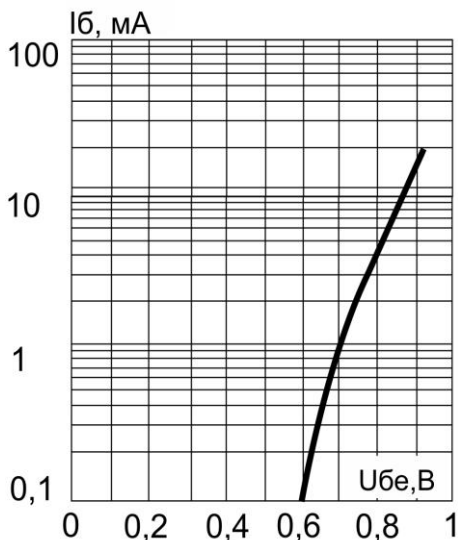


Рис.18. Вхідна статична характеристика транзисторів КТ817А-Г

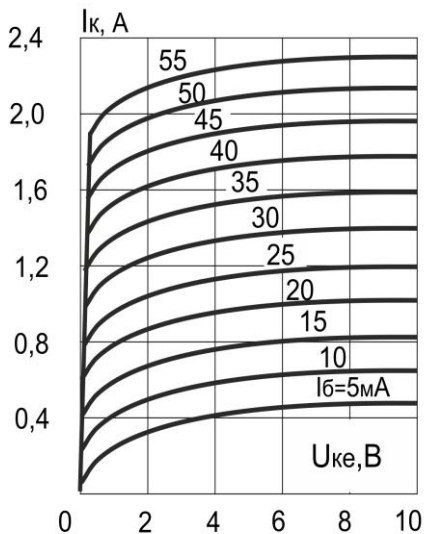


Рис.19. Вихідні статичні характеристики транзисторів КТ817А-Г

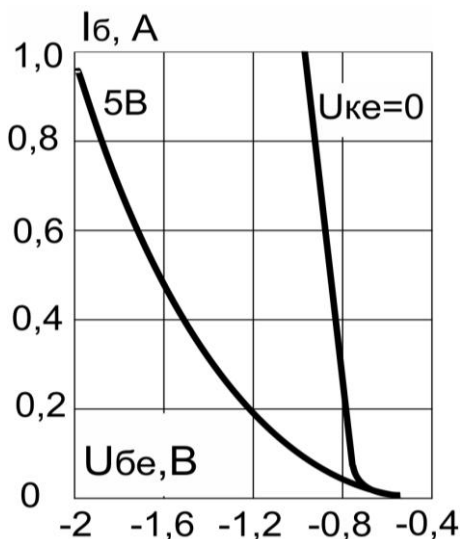


Рис.20. Вхідна статична характеристика транзисторів KT818A-Г

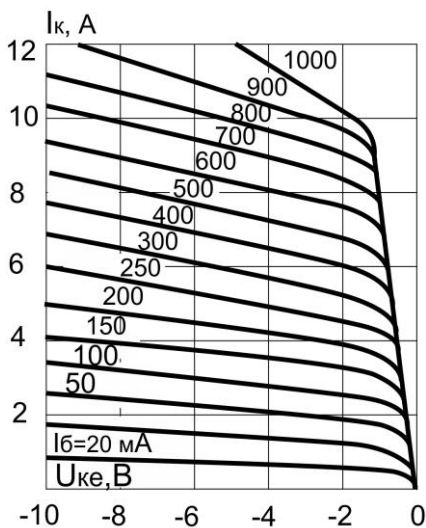


Рис.21. Вихідні статичні характеристики транзисторів KT818A-Г

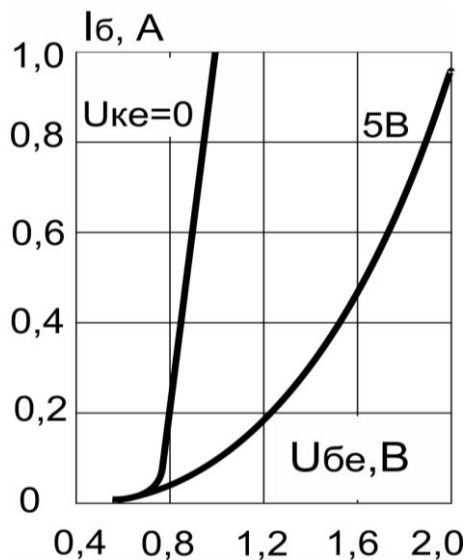


Рис.22. Вхідна статична характеристика транзисторів KT819A-Г

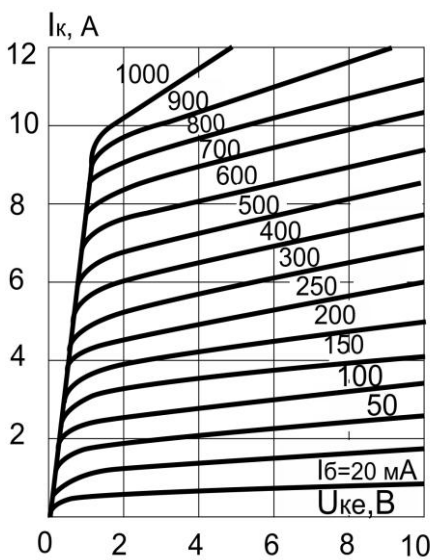


Рис.23. Вихідні статичні характеристики транзисторів KT819A-Г

Список рекомендованої літератури

1. Ю. П. Колонтаєвський, А. Г. Сосков. Промислова електроніка та мікросхемотехніка: теорія і практикум : навч. посіб. / За ред. А. Г. Соскова. 2-е вид. К. : Каравела, 2004. 432 с.
2. Електротехніка, електроніка та мікропроцесорна техніка : підручник / За ред. В. І. Мілих. К. : Каравела, 2007. 688 с.
3. Промислова електроніка : підручник / В. С. Руденко, В. Я. Ромашко, В. В. Трифонюк. К. : Либідь, 1993. 432 с.
4. Галкин .И. и др. Полупроводниковые приборы : справочник. Мн. : Беларусь, 1987. 285 с.
5. П. Хоровиц, У. Хилл. Искусство схемотехники. Т.т. 1-2. М., Мир, 1998.